

## 북한 서한만 분지의 석유시스템 분석

손병국<sup>‡</sup> · 박미숙

한국지질자원연구원 석유해저연구본부

### 요 약

북한의 서한만 분지는 상당량의 석유가 발견된 것으로 알려지고 있으나, 석유탐사에 대한 정보가 많지 않기 때문에 석유 산출에 대해서 정확하게는 알 수가 없다. 그러나 서한만 분지에 대한 지질과 광역층서, 그리고 수집된 탐사와 시추정보를 바탕으로 하여, 석유 생성 및 이동·집적에 대한 석유시스템을 수치 모델링 방법에 의하여 분석하였다. 서한만 분지는 고생대 탄산염암과 선캄브리아기의 변성암을 기반암으로 하며, 중생대층과 신생대층이 중첩되어 두껍게 퇴적되어 있는 열개분지(rift basin)이다. 석유시스템 모델링 결과, 주요 근원암층인 상부 유라기층에서 생성된 석유와 가스는 근원암으로부터 배출되어, 이 근원암층 내의 사질암층 지역과, 상부 유라기층 하위에 존재하는 탄산염 기반암층으로 이동하는 것이 관찰된다. 이 모델링 결과와 기존의 시추정보를 종합하여 해석하면 다음과 같은 석유생성, 이동, 집적에 대한 석유시스템이 추정된다. 즉, 서한만 분지의 석유와 가스를 생성한 주요 근원암은 심호환경에서 퇴적된 후기 유라기의 셰일층이다. 서한만 분지 발달 과정에서 장기간의 융기와 무퇴적 기간이 존재함에 따라 이 근원암층은 지속적으로 매몰이 진행되지 못하였고, 이에 따라 근원암층에서 석유와 가스가 생성은 되었으나 다량의 석유와 가스가 배출되지는 못하였다. 일부 배출된 석유와 가스는 상위의 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)과 제3기층으로 이동하였을 뿐만 아니라, 하위의 탄산염 기반암층으로도 이동한 것으로 추정된다. 서한만 분지에는 광역적인 덮개암층은 존재하지 않는다. 따라서 석유와 가스는 고생대, 중생대, 신생대층 각각의 퇴적층 내 암상변화와 관련된 층서트랩의 형태로 집적되어 있을 가능성이 많다. 이 연구는 제한된 정보와 자료를 바탕으로 수행된 석유시스템 분석이므로, 추후에도 서한만 분지에 대한 지속적인 정보와 자료의 확보가 요구되며, 이들 자료와 정보를 바탕으로 재해석이 필요하다.

**주요어:** 북한, 서한만 분지, 석유생성, 석유시스템, 모델링

**Byeong-Kook Son and Meesook Park, 2015, Petroleum system analysis of West Korea Bay Basin, North Korea. Journal of the Geological Society of Korea. v. 51, no. 5, p. 433-449**

**ABSTRACT:** It has been known to discover the amount of hydrocarbon in the West Korea Bay Basin, offshore western North Korea. The hydrocarbon occurrence in the basin, however, tends to be assumed due to lack of information on hydrocarbon exploration. As a conceivable understanding on the generation, migration and accumulation of hydrocarbon, the petroleum system was analyzed using numerical modeling on the basis of the drilling information as well as regional stratigraphy and sedimentary geology in the basin. The West Korea Bay Basin is characterized by a rift basin filled with thick Mesozoic and Cenozoic strata that unconformably overlie the Paleozoic carbonates and the Precambrian metamorphic basements. Petroleum system modeling shows that hydrocarbons generated from the Upper Jurassic source rocks expel and migrate into the juxtaposed sandy beds within the Upper Jurassic strata as well as into the underlying Cambrian carbonates. The petroleum system of the basin is presumable based on drilling information as well as the numerical modeling. The major source shale is the Upper Jurassic shaly strata that was deposited in the deep lacustrine environment. A long period of hiatus during the late Cretaceous to Paleocene, however, prevents a constant burial of the source rock, and thereby delays the expulsion of hydrocarbon from the source rock. Regional seal seems to be absent in the basin, therefore, the hydrocarbon would be accumulated within the subtle stratigraphic traps that formed due to facies variations. Because of the limited information on geology in the basin, the petroleum system analysis in the study needs to modify in some details and should be extended for more sophisticated understanding in the future.

**Key words:** North Korea, West Korea Bay Basin, hydrocarbon, petroleum system analysis, numerical modeling

<sup>‡</sup> Corresponding author: +82-42-868-3208, E-mail: [sbk@kigam.re.kr](mailto:sbk@kigam.re.kr)

(Byeong-Kook Son and Meesook Park, Petroleum and Marine Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 34132, Republic of Korea)

## 1. 서론

한반도와 주변 해역에서의 석유탐사는 수십 년 동안 이루어져 왔다. 우리나라의 동해 대륙붕에서는 경제성 있는 천연가스가 발견되어 상업생산을 하고 있으며, 새로운 석유와 가스의 발견을 위하여 탐사 및 시추작업을 계속해 오고 있다(Lee *et al.*, 2004, 2011; Lee and Son, 2007; Son and Park, 2013). 남해와 서해 대륙붕에서도 물리탐사와 시추작업이 수행되었으나 석유나 가스의 발견에는 실패하였다(Lee *et al.*, 2006; Park *et al.*, 2010; Kim and Son, 2013). 석유발견을 위해서는 남해와 서해에서도 더 많은 탐사와 시추작업이 필요하나 주변국과의 해양경계 갈등 등의 제약 조건들이 많아 동해에 비하여 탐사활동이 활발하지 않다.

한편, 북한의 석유탐사와 개발에 대해서는 알려진 바가 많지 않다. 그러나 북한도 1960년대 이후 석유개발에 관심을 갖고 육상과 대륙붕에서 많은 물리탐사와 시추작업을 수행해 왔다. 뿐만 아니라 지금도 소규모이지만 원유생산이 이루어진 것으로 알려지고 있다(Killops *et al.*, 1991; Massoud *et al.*, 1991; Choi, 1999; Cai, 2005; JOGMEC, 2006; Dai, 2011). 특히, 1997년 일본 동경에서 개최된 북한의 석유 설명회에서는 서한만과 남포연안 지역에 50-430억 배럴 규모의 석유자원이 존재할 가능성이 있다고 발표되기도 했다(Choi, 1999).

지금까지 알려진 바에 의하면, 북한에서는 서한만 지역이 가장 많은 양의 석유자원이 존재할 것으로 전해지고 있으며, 실제로 서한만 지역에서 지금까지 13개 시추공이 시추되었으며 거의 모든 시추공에서 유징이 발견되었다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Choi, 1999; Dai, 2011). 유징이 존재한다는 것은 서한만 지역은 적어도 한 개 이상의 석유시스템이 존재한다는 것을 지시한다(Magoon and Dow, 1994).

석유시스템은 성숙된 근원암과 석유를 집적시키기 위해 적합한 지질학적 조건 하에서 생성된 석유가 이동하여 집적되기까지의 전 과정을 시·공간적인 영역에서 생각하는 개념이기 때문에 서한만 분지의 석유를 제대로 이해하기 위해서는 석유시스템 분

석이 필요하다. 또한, 석유시스템을 정확하게 분석하고 체계적으로 가시화 하는 가장 좋은 방법은 석유시스템 수치모델링을 실시하는 방법이다(Welte and Yalçin, 1987; Wygrala, 1988; Welte *et al.*, 1996).

아직까지 상업적 생산이 가능한 석유발견 소식은 들리지 않고 있지만, 유징이 확인된 서한만 지역의 석유시스템을 밝히는 것은 큰 의미가 있다. 따라서 이번 논문에서는 서한만 분지에 대하여 석유시스템 개념과 석유시스템 모델링 방법을 적용하여 이 지역의 석유 유망성을 분석해 보고자 한다.

## 2. 자료 및 연구방법

석유시스템 분석 및 모델링을 수행하기 위해서는 연구지역에 대한 다수의 양질의 데이터가 요구된다(Wygrala, 1988; Poelchau *et al.*, 1997; Yahi *et al.*, 2001; Lee and Son, 2007; Kim and Son, 2013; Son and Park, 2013). 그러나 북한의 석유탐사 및 개발에 대한 정보를 입수하는 것은 대단히 어렵다. 따라서 우선 매스컴 보도자료, 온라인 자료, 그리고 약간의 공개된 학술자료로부터 북한의 석유개발 현황을 분석하였다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Cai, 2005; JOGMEC, 2006; Dai, 2011). 또한, 주변국에서 발간된 자료로부터 북한지역 및 서한만 지역의 석유탐사 자료를 수집하였으며, 일부자료는 자료 소유자로부터 구매하여 정밀하게 분석하였다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Choi, 1999; Stewart, 1999; Dai, 2011). 한편, 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 국내·외의 개인적 네트워크도 활용하였다. 그렇다 하더라도 이번 연구를 위해서 충분한 자료가 사용될 수는 없었으며 매우 한정된 자료만이 사용되었다. 그러나 서한만 분지 석유시스템의 일반적인 경향을 분석하기에는 적합한 자료들이었다.

자료는 철저하게 석유시스템의 관점에서 분석되었다. 즉, 성숙된 근원암으로부터 석유의 집적에 필요한 저류암과 덮개암, 그리고 근원암을 성숙시키는데 필요한 하중암(overburden rock)의 지질요소를 확인하고, 석유의 생성, 배출, 이동의 과정을 시·공간적으로 분석하였다. 이를 위하여 석유시스템을 가

장 효과적으로 분석하고 가시적으로 확인 가능한 컴퓨터 모델링 방법을 사용하였다. 모델링을 위하여 미국 Platte River Associates사의 BasinMod<sup>®</sup> 소프트웨어를 사용하였다.

석유시스템 1-D 모델링 모듈을 사용하여, 이용 가능한 자료가 많이 확보된 시추공에 대한 매물사와 지열사를 계산하였다. 캘리브레이션을 위해 비트리 나이트 반사도 데이터를 사용하였으며, 분지발달사를 고려하여 고지열류량 값을 최적화함으로써 성숙도 모델을 완성하였다. 이를 바탕으로 그 시추공 지점에 존재하는 근원암에서의 석유생성량 및 배출량을 지질시대에 따라 계산하였다. 퇴적물 내 유기물로부터 탄화수소가 생성되는 과정은 계산된 성숙도와 반응속도 모델(kinetics model)을 적용하여 계산하였다(Ungerer, 1990; Welte *et al.*, 1996).

석유시스템 2-D 모델링에서는 지질시대 동안에 일어나는 탄화수소의 생성, 이동, 집적을 2차원 단면 상에서 계산하여 가시화하였다(Ungerer, 1990; Waples, 1994). 이용할 수 있는 단면이 많지 않기 때문에 한 개의 남북방향 탄성파 해석단면의 분석을 통해 퇴적물의 매물과정, 지질시대동안 탄화수소의 생성과 탄화수소가 움직이는 방향과 경로, 탄화수소가 집적된 위치 등을 모델링하였다. 탄화수소의 이동모델은 부력과 모세관압을 고려하여 상대투과율 개념을 다상 유체에 적용한 다시의 법칙(Darcy's law)을 사용하였다(Ungerer *et al.*, 1990; Welte *et al.*, 1996).

### 3. 서한만 지역의 석유개발 역사

보도자료 등 각종 자료 들을 분석해 보면, 북한은 지질·지구물리학적 분석과 탐사 결과로부터 석유잠재력이 유망한 7개 지역을 선정하였다(Choi, 1999; JOGMEC, 2006). 즉, 동해 원산 앞바다, 서해 남포 앞바다, 함경북도 길주와 경성, 평안남도 온천과 안주 및 평양 근교가 발표된 유망지역이다. 하지만 이중 정말로 유망한 곳은 청천강 하구 유역의 안주를 중심으로 하는 안주 분지와 서해 해상의 서한만 분지이다(그림 1). 안주 분지와 서한만 분지에서는 시추에 의하여 유정이 확인되었으며, 안주 분지는 에오세층에서 그리고 서한만 분지는 후기 백악기 퇴적층(Upper Cretaceous strata)에서 상당량의 석유를 채취하였다(Massoud *et al.*, 1991, 1993; Choi, 1999;

Stewart, 1999; JOGMEC, 2006).

원래 안주지역은 북한 최대의 석탄생산을 자랑하는 안주탄전이 있는 곳이다. 1964년에 이 탄전의 조사 및 개발과정에서 처음으로 유정이 확인되어 북한에서도 석유부존 가능성을 처음으로 공식 인식한 것으로 알려져 있다. 그러나 1800년대부터 이미 안주지방에는 바위틈에서 기름이 유출되고, 이 기름을 주민들이 등화용으로 사용했다고 한다(JOGMEC, 2006). 세계적인 유전지역들은 역사시대부터 석유의 유출에 대한 유적이나 기록이 존재한다는 점을 고려할 때, 이와 같은 점은 북한 서해지역의 석유 유망성을 간접적으로 지시한다고 할 수 있다.

이후 북한은 중국과 구 소련의 지원 하에 물리탐사와 시추작업을 수행하였으며, 중국의 보하이만 분지에서 대규모의 유전이 발견됨에 따라 비슷한 지질 조건을 가지고 있는 서한만 분지에서도 석유발견을 기대하게 되었다. 1970년대까지 중국, 소련, 유고슬라비아 등 공산권 국가의 도움을 받아 탐사작업을 수행해 온 북한은 1980년대부터는 탐사자본과 기술을 얻기 위하여 서구의 석유회사가 참여할 수 있도록 개방하였고, 서구회사들과 물리탐사와 시추작업을 공동 수행하여 현재까지 서한만 지역에 13개 공을 시추하였으며 대부분의 시추공에서 유정이 확인되었다(Stewart, 1999; AMINEX, 2005; JOGMEC, 2006). 특히, 생산테스트를 수행한 결과 전기 백악기 사암층에서 일산 450배럴의 석유가 회수되기도 하였다(Choi, 1999). 이후에도 다수의 서구회사들이 광구를 획득하여 탐사 및 개발을 수행하였으나 정치적인 이유 등으로 철수하고, 이후 서한만 석유개발은 답보상태에 있는 것으로 알려지고 있다(JOGMEC, 2006).

### 4. 서한만 분지의 지질

황해의 북부지역인 중국과 북한 사이의 해역에 발달되어 있는 서한만 분지(West Korea Bay Basin)는 중국 측에서는 북황해 분지(North Yellow Sea Basin)로 불리고 있으며, 분지의 동쪽지역이 북한 해역에 해당된다(그림 1). 수심 75 m 이하의 대륙붕에 발달되어 있는 서한만 분지는 육상으로 연장되어 안주 분지와 연결되어 있다. 서한만 분지는 고생대 퇴적암과 선캄브리아기의 변성암을 기반암으로 하며, 중생대층과 신생대층이 두껍게 퇴적되어 있는 열개

분지(rift basin)이다. 중생대층과 신생대 퇴적층의 두께는 7,000 - 10,000 m에 달한다(Choi, 1999). 분지는 용기부에 의해서 작은 소분지(sag)로 나누어지며, 이 중 동부 소분지가 북한영역에 해당되어 이곳에 석유탐사 광구가 설정되어 있다(그림 1).

서한만 분지는 중국 측에 분포하는 대륙 내 열개 분지(intracratonic rift basin)와 유사한 과정을 거쳐 형성된 것으로 추정되며, 한중지괴를 기반암으로 하는 열개분지(cratonic rift basin)의 한 부분이다. 즉, 중국 동부와 서한만 일대에 발달해 있던 선캠브리아기와 고생대의 플랫폼(platform)은 맨틀물질의 상승으로 인해 인장력이 발생하고 열개되어, 정단층에 의한 북동-남서 방향의 함몰지구대(graben)가 형성되었다. 대륙지각이 얇은 이 지구대는 급속히 침강하게 되고 이 곳에 두꺼운 중생대와 신생대 퇴적물이 쌓이게 되었다. 서한만 분지를 포함하는 북한의 서해지역은 고생대 이전부터 여러 차례의 퇴적작용이 있었으며 송림조산운동이 일어난 이후, 후기 중생대와 전기신생대에 침강이 일어나면서 현재의 형태를 갖추게 되었다. 즉, 열개 이전에는 시생대와 고생대의 탄산염 암석이 우세한 플랫폼(platform)이었던 서한만 지역은, 조구조 활동에 의하여 후기 쥬라기와 초기 백악기 동안, 분지의 남쪽경계부와 북쪽경계부에서는 동-서 방향 혹은 북동방향의 정단층이 현저한 지구대(graben) 형태의 열개분지가 발달하게 되어 중생대 퇴적활동이 시작되었다. 이후 단층들은 고제3기 에오세와 올리고세 동안에 재활성화되어 서한만 분지의 신생대 퇴적활동 형태를 규제하게 된다. 이와 같이 서한만 분지는 2단계의 인장력에 의한 단층규제에 의하여 발달하였으며, 신제3기 동안에는 열적침강에 의하여 계속하여 깊이가 증가하였다. 이와 같이 인장력과 열적침강 등을 거치는 3단계의 분지형성과정 동안, 서한만 분지는 10 km에 이르는 두꺼운 중생대와 신생대 퇴적층이 중첩되어

용이 있었으며 송림조산운동이 일어난 이후, 후기 중생대와 전기신생대에 침강이 일어나면서 현재의 형태를 갖추게 되었다. 즉, 열개 이전에는 시생대와 고생대의 탄산염 암석이 우세한 플랫폼(platform)이었던 서한만 지역은, 조구조 활동에 의하여 후기 쥬라기와 초기 백악기 동안, 분지의 남쪽경계부와 북쪽경계부에서는 동-서 방향 혹은 북동방향의 정단층이 현저한 지구대(graben) 형태의 열개분지가 발달하게 되어 중생대 퇴적활동이 시작되었다. 이후 단층들은 고제3기 에오세와 올리고세 동안에 재활성화되어 서한만 분지의 신생대 퇴적활동 형태를 규제하게 된다. 이와 같이 서한만 분지는 2단계의 인장력에 의한 단층규제에 의하여 발달하였으며, 신제3기 동안에는 열적침강에 의하여 계속하여 깊이가 증가하였다. 이와 같이 인장력과 열적침강 등을 거치는 3단계의 분지형성과정 동안, 서한만 분지는 10 km에 이르는 두꺼운 중생대와 신생대 퇴적층이 중첩되어

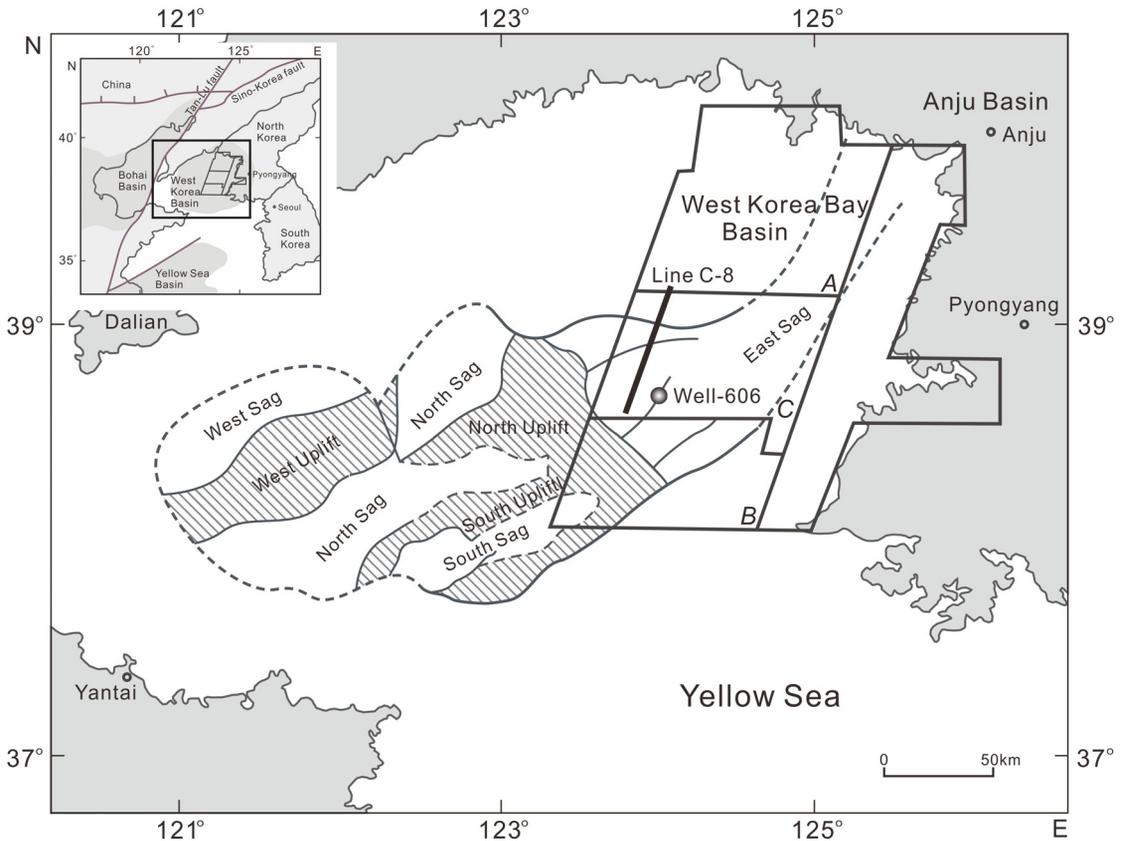


Fig. 1. Study area including the well and seismic line for petroleum system modeling.

퇴적된 형태를 갖추게 되었다(Li et al., 2012).

서한만 분지는 분지 형성을 좌우한 단층에 의해 규제되어 여러 개의 단층블록으로 나뉘게 되어 소분지 지역과 용기지역이 존재한다(그림 1). 단층에 의하여 규제된 서한만 분지의 층서는 석회암, 돌로마이트와 같은 탄산염암 및 점판암, 사암 등으로 이루어진 원생대 후기 내지는 고생대 전기(캠브로오르도비스기)의 지층을 기반암으로 하여, 그 위에 후기 쥐라기의 퇴적층(Upper Jurassic strata)이 부정합적으로 축적되어 있다(그림 2). 후기 쥐라기에 퇴적된 이 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)은, 하부는

흑색 이질암층이 우세하며, 중부는 사암 내지는 이질 석회암층이 우세하고, 상부는 다시 흑색 이질암층이 우세하다(그림 2). 전체적으로 쥐라기 퇴적층은 흑색이질암이 우세하기 때문에 “흑색 이암층”으로 불리고 있으며 서한만 분지의 주 석유근원암이다. 이 흑색 이질암층은 심호성 환경에서 퇴적되었으며, 두께는 두꺼운 곳에서 3,500 m에 이른다.

후기 쥐라기 퇴적층(Upper Jurassic strata)의 위에는 정합적으로 전기 백악기의 퇴적층(Lower Cretaceous strata)이 쌓여 있다. 이 백악기층의 하부는 회색 또는 보라색을 띠는 이암, 사암, 역암의 호층이 발달하

Age		Lithology	Thickness	Oil show	Environment		
Cenozoic	Quaternary	Pleistocene	Fine sand, Mud	30~80m		Fluvial	
		Pliocene	Sandstone, Conglomerate, Shale	450m			
	Neogene	Miocene	Sandstone, Conglomerate(brown coal)	200~300m		Fluvial	
		~<Unconformity>					
	Paleogene	Oligocene	Upp.	Sandstone, Conglomerate, Shale(coal)	~3,000m		Lacustrine
			Mid.	Alternation of Sandstone, Conglomerate, Silt, and Shale			
Low.			Alternation of purple Shale, Silt, and Conglomerate	●		Swamp	
Eocene	Purple calcareous mudstone, sandstone, pebble-bearing sandstone	~750m	●	Lacustrine Fluvial			
~<Unconformity>							
Mesozoic	Lower Cretaceous	Upp.	Purple calcareous mudstone, sandstone, pebble-bearing sandstone	~3,000m		Lacustrine Fluvial	
		Mid.	green calcareous mudstone, black shale				
		Low.	purple-gray sandstone, conglomerate		●		
	Upper Jurassic	Upp.	Black shale	~3,500m		Lacustrine (deep lake)	
		Mid.	Gray sandstone, Muddy limestone		●		
		Low.	Black shale				
~<Unconformity>							
Paleozoic	Carboniferous~Ordovician	Limestone, Dolomite, Slate, Sandstone	5,000m~	●			
Precambrian	Limestone, Dolomite, Slate, Sandstone						

Fig. 2. Stratigraphy of the West Korea Bay Basin.

였으며, 중부는 적자색 또는 회녹색을 띠는 석회질 이암과 흑색을 띠는 이질암이 우세하다. 그리고 상부에는 적자색의 석회질 이암과 사암이 우세하다. 전체적으로 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)은 붉은 자주색을 띠고 있어서 “적자색 지층”으로 불리고 있다. 하부백악기층은 건조기후의 하천성 퇴적물로 구성되어 있는 것으로 생각되며 두꺼운 곳에서는 2,000 m에 이른다.

이후 5,000 만년의 장기간 동안 퇴적활동이 중단되어 후기 백악기 및 팔레오세 지층은 결층이다. 따라서 하부 백악기층 위에는 에오세 퇴적층이 부정합 관계로 퇴적되어 있다. 에오세층은 자주색 이암, 사암, 함역질 사암으로 이루어졌으며, 호수성 퇴적물로 최대 750 m의 두께를 나타낸다.

에오세층 위에는 에오세층과 정합적으로 올리고세층이 발달한다. 올리고세층은 분지의 중앙부에서는 매우 두꺼워서 3,000 m에 달하는 곳도 있다. 하부의 적자색을 띤 이암-실트암-사암 호층대, 중부의 사암-실트암-역암 호층대, 상부의 사질역암-이암(함탄층) 호층대로 나누어지는데, 일반적으로 상위로 갈수록 조립질이 우세하게 나타난다. 올리고세층은 강, 호수, 습지 등 다양한 퇴적 환경에서 퇴적된 것으로 생각되고 있다.

서한만 분지 층서의 최상위는 마이오세, 플라이오세 및 플라이스토세 지층이 부정합 관계로 광역적

으로 수평으로 발달한다. 하천성의 사암, 역암, 이암으로 이루어졌으며, 500 ~ 700 m의 두께를 나타낸다.

### 5. 서한만 분지의 석유시스템 모델링

#### 5.1 시추공 1-D 모델링

1-D 석유시스템 모델링은 현재 이용할 수 있는 자료가 제한되어 있기 때문에, 서한만 분지의 대표적인 시추공인 606공에 대해서만 실시하였다(그림 1). 그러나 606공은 전기 백악기의 사암층에서 유일하게 원유가 산출된 시추공이고, 서한만 분지를 대표하는 시추공이므로 서한만 분지의 석유시스템을 이해하기에는 적합한 시추공이다. 특히, 606공은 기존의 문헌으로부터 1-D 석유시스템 분석을 위한 지화학 입력 자료의 추출이 가능한 시추공이다(Massoud *et al.*, 1991). 606공의 총심도는 3,091 m이며, 후기 주라기에 퇴적된 상부 주라기층(Upper Jurassic strata)까지 관통하였다. 시추공을 통과하는 북북동-남남서 단면에서 보면, 606공은 두꺼운 신생대층과 하부 백악기층, 그리고 상부 주라기층의 상부까지 관통하고 있다(그림 3). 시추공 가장 심부에서 나타나는 후기 주라기의 퇴적층은 주로 심호성의 흑색 이질암으로 구성되어 있으며 사암, 실트암 등이 협재되어 있다. 이 상부 주라기층은 서한만 분지의 주요 근원암으로 인식되고 있다(Massoud *et al.*, 1991; Wu

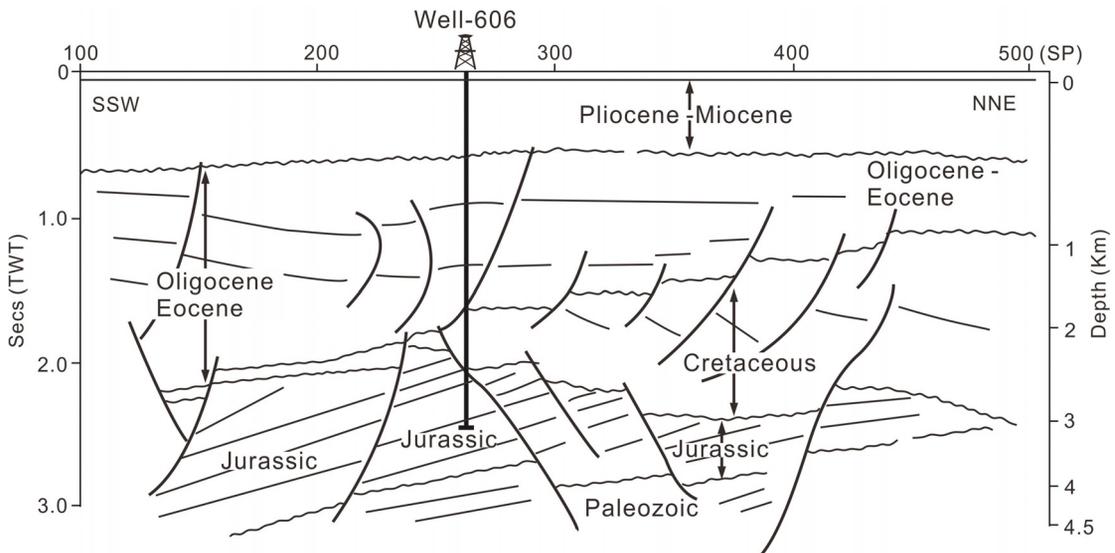


Fig. 3. SSW-NNE cross-section including the well 606 (modified from Massoud *et al.*, 1991).

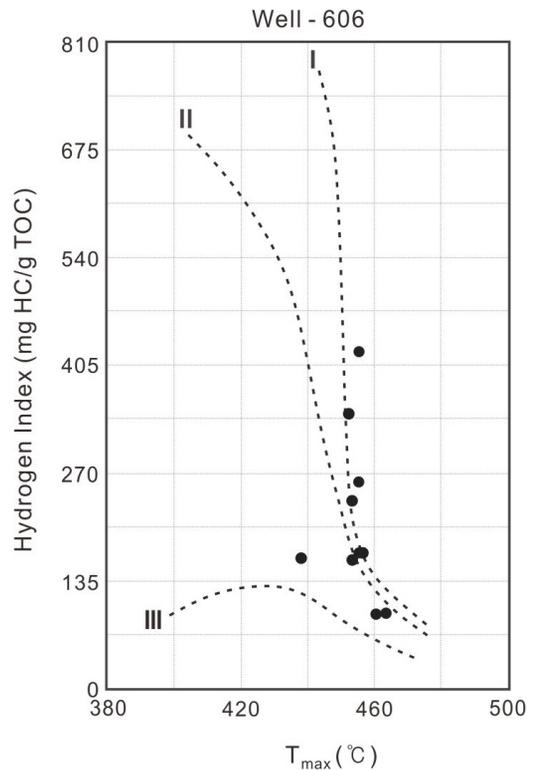
**Table 1.** Stratigraphic parameters for the 1-D modeling of well 606.

Formation unit	Begin age (Ma)	Top depth (m)	Eroded thickness (m)	Lithology	Petroleum system event
Pliocene	5.3	0		Ss 80%, Sh 20%	
Miocene	23	100		Ss 100%	
Paleocene	65.5	600		Ss 40%, St 30%, Sh 30%	
Erosion-2	97.5		-600	Sh 70%, St 25%, Ss 5%	Seal
Lower Cretaceous	130	2100		Ss 60%, Sh 40%	Reservoir
Erosion-1	145		-250		
Upper Jurassic	160	2345		Ss 5%, St 5%, Sh 90%	Source

\* Sh: Shale, St: Siltstone, Ss: Sandstone.

*et al.*, 2008). 하부 백악기층은 충적지나 델타성 사암이 우세하고 주로 적색을 띠고 있다. 이 전기 백악기의 사암층은 양호한 저류암층으로 해석되고 있다. 606공에서 후기 백악기의 퇴적층은 존재하지 않으며 하부 백악기층 위에 신생대층이 퇴적되어 있다(그림 3).

모델링을 위한 파라미터는 제한된 문헌으로부터 최대한 합리적으로 추출하여 입력하였다. 문헌에서 숫자가 제시되지 않은 경우는 그림으로부터 숫자를 추출하여 추정된 근사값을 입력하였다. 시추공 606의 1-D 모델링을 위한 주요 층서 파라미터의 입력 결과는 표 1과 같다. 각 층의 퇴적이 시작된 시기와 각층의 최상위 심도를 입력하였으며 상부 쥐라기층과 하부 백악기층이 융기되어 삭박된 두께도 입력하였다. 암상은 문헌에서 제시된 자료와 서한만 분지의 일반적인 층서 및 암상 자료로부터 사암, 이암, 실트암의 평균조성을 고려하여 혼합된 암상을 입력함으로써 각 지층의 물성치 계산이 가능하게 하였다. 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)은 석유가 발견된 저류층이고, 석유를 생성한 근원암은 하부 백악기층의 하위에 존재할 것으로 예측되므로 흑색 이질암이 우세한 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)을 유효 근원암으로 생각하고 있다(Massoud *et al.*, 1991). 따라서 본 1-D 모델링에서도 상부 쥐라기층을 근원암층으로 설정하였다. 상부 쥐라기층의 TOC 값은 최대 2.5%이른다(Massoud *et al.*, 1993). 따라서 모델링을 위한 초기TOC (initial TOC)함량은 3%를 입력하여 계산하였다. 록에발 열분석 자료를 수소지수(hydrogen index)값과  $T_{max}$ 값을 축으로 하는 그림에 표시하면 주로 타입 I의 진화경로선을 따라서 도시된다(그림 4). 열개(rifting)에 의한 분지발



**Fig. 4.** Rock-Eval pyrolysis data plotted on Hydrogen Index vs.  $T_{max}$  diagram. Pyrolysis data are collected from Massoud *et al.*, 1993.

달과정에서, 열개 초기에 호수퇴적물이 두껍게 쌓이게 되고 이때 퇴적물과 함께 대량으로 퇴적되는 미생물조류(algae)는 케로젠 타입 I로 진화하게 되는 것으로 알려져 있다(Waples, 1985; Peters *et al.*, 2005). 한편, 호수 주변부는 목질편(plant debris)의 유입이 활발하며, 이들은 매몰되어서 타입 III 케로젠으로

진화된다. 따라서 심호성의 퇴적환경을 고려할 때 초기 케로젠은 타입 I이 우세하였을 것이며 일부 타입 III의 유입도 있었을 것이다. 이와 같은 점을 고려

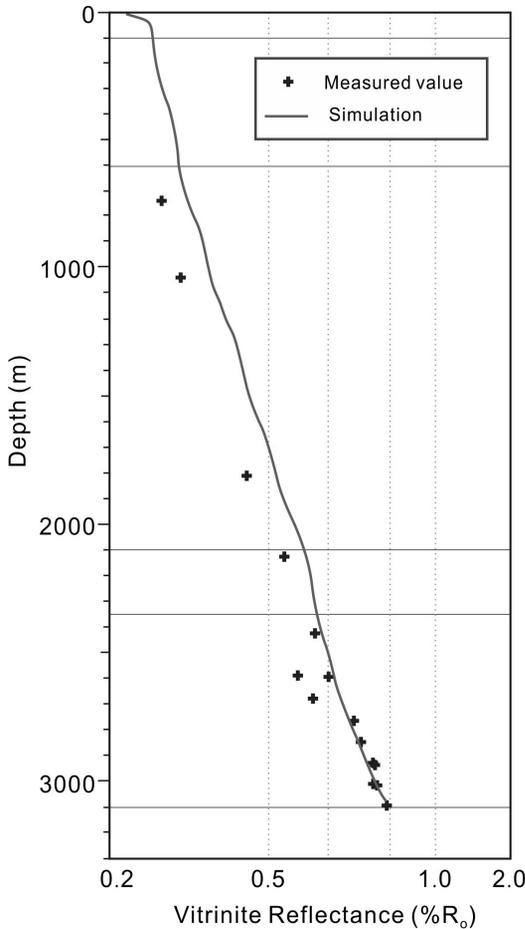


Fig. 5. Maturity model calculated from the calibration with measured %R<sub>0</sub> values.

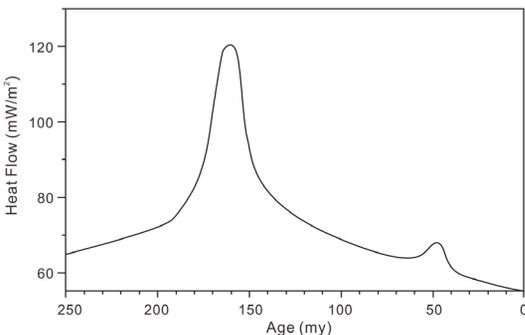


Fig. 6. Heat flow history model derived from the optimization with maturity model of well 606.

하여, 석유시스템 모델링을 위하여 타입 I과 타입 III가 8:2로 혼합된 케로젠을 입력하여 키네틱스 계산을 수행하였다.

성숙도 모델링은 비트리나이트 반사도 R<sub>0</sub>값을 Sweeney and Burnham (1990)의 Easy%R<sub>0</sub> 알고리즘을 사용하여 계산하였다. 계산값을 최적화하기 위하여 실측된 R<sub>0</sub>값에 최적으로 일치시키기 위해 캘리브레이션 과정을 수행하였다(그림 5). 비트리나이트 반사도 값은 비트리나이트를 포함하고 있는 지층이 받은 최대의 온도를 지시하기 때문에 성숙도를 정량화하는 가장 좋은 지표로써 사용되고 있다(Waples, 1985; Welte *et al.*, 1996). 비트리나이트 성숙도 모델링에서 온도를 계산하기 위해서는 고지열류량(paleo-heat flow)을 입력해야 된다(Ungerer *et al.*, 1990; Waples *et al.*, 1992; Welte *et al.*, 1996). 고지열류량 값은 실측값과의 최적화(캘리브레이션) 과정에서 지질시간(시대) 변화에 따른 고지열류량 모델값을 이용해 결정되었다(그림 6). 최적화 과정에서 분지발달 역사를 고려하여 분지가 열개될 때에 열류량을 최대로 하였으며, 이후 열류량 값이 감소하는 형태로 입력했을 때 최적의 성숙도 모델이 완성되었다(McKenzie, 1978). 즉, 주라기의 열개(rifting)시에 약 120 mW/m<sup>2</sup>이었던 열류량은 이후 감소하기 시작하여 606공의 후기 주라기층이 쌓이던 시기는 약 70 mW/m<sup>2</sup>까지 지속적으로 감소한다. 신생대 초기에 열개작용이 재 활성화 됨에 따라 약간의 열류량 증가가 발생하지만 이후 계속하여 열류량은 감소하여 현재는 약 58 mW/m<sup>2</sup>의 열류량을 보이는 것으로 모델링된다(그림 6). 고지열류량 모델과 최적화된 성숙도 모델에서 볼 수 있는 바와 같이 백악기층과 주라기층은 모두 석유생성단계(oil window)에 도달해 있는 것을 알 수 있다(그림 5).

매몰사 및 지열사 모델링 결과는 606공을 구성하는 각 퇴적층의 지질시기별 퇴적두께 및 퇴적율을 잘 보여주고 있다(그림 7). 후기 주라기 동안 퇴적율이 매우 높았음을 알 수 있으며 약간의 용기 및 삭박 작용을 거친 후에 전기 백악기 퇴적층이 서서히 퇴적되었다. 백악기 말에도 대규모의 용기와 삭박을 거쳤으며 이후 신생대 퇴적층이 두껍게 쌓였다. 상부 주라기층(Upper Jurassic strata)의 퇴적시기에는 퇴적율이 높았을 뿐만 아니라 지열류량도 높은 시기이기 때문에 주라기층은 약 1,000 m 매몰되었

을 때부터 석유생성단계에 도달한다(그림 7). 그러나, 이후 두 번의 융기에 의하여 매몰온도는 크게 증가되지 않았으며, 신생대 이후에 지속적인 매몰에 의하여 매몰온도도 다시 증가한다.

606공은 심추심도가 3,091 m이며 주라기 근원암층의 최상부까지만 시추되었다. 606공의 이 주라기 근원암층은 석유생성단계에는 도달하였으나 충분한 석유의 생성과 근원암에서 석유를 배출시키기에 충분한 매몰심도와 온도에는 이르지 못한 것으로 보인다. 그러나 606공의 시추심도 보다도 깊은 심도에 두껍게 존재하는 주라기층은 충분한 양의 석유를 생성하고 배출시킬 수 있는 온도에 도달하였을 것으로 보인다(그림 3). 606공의 근원암인 상부 주라기층은 매몰 초기 열류량이 높고 매몰속도가 빠르게 따라 약 150 Ma부터 빠르게 석유와 가스의 생

성이 시작되어 생성량이 빠르게 증가한다(그림 7). 백악기 시기에는 매몰정도가 크지 않기 때문에 석유가스 생성량도 크지 않다. 그 후 융기와 삭박과정 동안에는 석유와 가스의 생성이 거의 중단되었다가, 신생대 이후 시기부터는 매몰과 온도가 증가하면서 석유생성량은 다시 증가한다(그림 7). 606공의 매몰심도가 크지 않기 때문에 생성된 석유와 가스가 근원암에서 생성은 되었으나 배출은 되지 않는 것으로 모델링된다. 그러나 시추심도보다 하위에 두껍게 존재하는 상부 주라기층(Upper Jurassic strata)에서는 많은 양의 석유와 가스가 배출되었을 것으로 생각된다.

5.2 단면도에 대한 2-D 모델링

북한에서 설정한 광구의 서쪽지역에 위치하며,

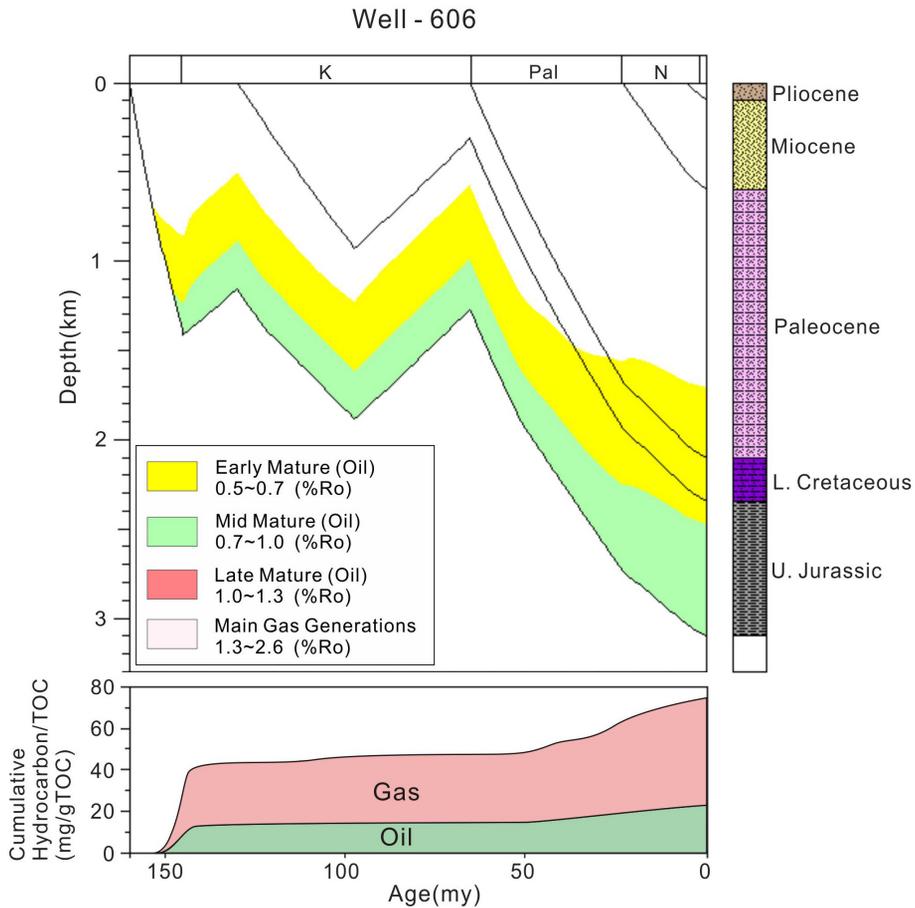


Fig. 7. Burial and thermal history model with hydrocarbons generation through geologic time.

Table 2. Key input parameters for 2D modeling.

Formation unit	Begin Age (Ma)	Lithology (%)	Petroleum system event
Floor	0		
Neogene (L)	23	Ss 80%, Sh 20%	
U.Oligocene (K)	26.5	Ss 60%, Sh 40%	
M.Oligocene (J)	30	Ss 40%, St 30%, Sh 30%	
L.Oligocene (I)	34	Ss 50%, St 20%, Sh 30%	
Eocene (H)	130	Ss 30%, Sh 70%	Seal
Low.Cre_Upp (G)	135	Ss 40%, St 10%, Sh 50%	Reservoir
Low.Cre_Mid (F)	140	Ss 10%, St5%, Sh 7%, Lm 15%	
Low.Cre_Low (E)	145.5	Ss 100%	Reservoir
Upp.Jurassic_Upp (D)	150	Sh 100%	Source
Upp.Jurassic_Mid (C)	155	Ss 40%, Sh 40%, Lm 20%	Reservoir
Upp.Jurassic_Low (B)	250	Ss 10%, Sh 90%	Source
Paleozoic (A)		Ss 20%, St 10%, Sh 10%, Lm 30%, Dm 30%	

\* Sh: Shale, St: Siltstone, Ss: Sandstone, Lm: Limestone, Dm: Dolomite

남남서-북북동 방향을 지나는 C-8 탄성과 축선의 단면에 대하여 2-D 모델링을 실시하였다(그림 1). 탄성과 단면은 서한만 분지의 석유개발에 참여했던 서방회사에 의하여 해석되었으며, 주변의 시추결과 등을 고려하여 서한만 분지의 모든 퇴적층이 잘 구분되고 합리적으로 설정되어 있다(Stewart, 1999). 또한, 단면은 거의 남북 방향이기 때문에 정단층에 의한 함몰지구대(graben) 형태도 잘 보여주고 있다(그림 8). 따라서 서한만 분지의 2-D 석유시스템 모델링을 수행하여 석유의 생성과 이동을 관찰하고 이해하기에는 적합한 단면이다.

2-D 모델링에서는 현재의 각 지층과 구조형태를 탄성과 해석단면을 기본 바탕으로 하여 입력하였으며, 두껍게 나타나는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)과 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)은 암상을 고려하여 상부, 중부, 하부의 3개 단위층으로 세분화하여 입력하였다(표 2; 그림 8). 2-D 모델링을 위해서는 퇴적층 단면에 층서 뿐만 아니라, 시간층서(chrono-stratigraphy)도 그래픽으로 입력해야만 지층의 시공간적 변화를 계산할 수 있다(Welte *et al.*, 1996; Lee and Son, 2007; Hantschel and Kauerauf, 2009; Kim and Son, 2013; Son and Park, 2013). 따라서 문헌에서 제시된 서한만 분지의 일반 층서표를 참고하여 시간층서를 그래픽으로 입력하였다(그림 8).

물성치 계산을 위한 각 퇴적층의 암상은 사암, 실트암, 셰일, 탄산염암의 구성함량을 혼합하여 입력하였다(표 2). 지열류량은 606공의 성숙도 모델을 캘리브레이션을 통해 수정한 고지열류량 모델을 입력하였다(그림 6). 또한 근원암층인 후기 쥐라기층의 초기 TOC(initial TOC)값은 3%로 입력하였으며 1-D 모델링과 같이 케로젠 타입 I과 III가 혼합된 키네틱스 변수 값을 사용하여 모델링하였다.

그림 8의 시간층서 입력 그림에서 볼 수 있는 바와 같이, 서한만 분지는 중생대 대부분의 기간인 트라이아스기와 쥐라기 동안에는 퇴적이 일어나지 않았다. 또한, 백악기 후기와 팔레오세의 장기간 동안에도 퇴적이 일어나지 않았다. 즉, 서한만 분지는 고생대 탄산염 기반암에 중생대 후기의 퇴적층과 신생대의 퇴적층들만 중첩되어 쌓인 것을 잘 보여주고 있다. 온도 모델링에 의하면 중생대 퇴적층들은 모두 석유생성이 가능한 100°C의 온도에 도달하였음을 보여주고 있다. 그러나, 신생대 퇴적층들은 깊이 매몰된 일부 지역만 석유생성이 가능한 온도에 도달하였다.

2-D 석유시스템 모델링 결과는 석유의 경우는 그림 9에, 가스의 경우는 그림 10에 포화도 모델로써 도시하였다. 포화도 모델은 지질시간이 경과함에 따라 퇴적층에 포화되는 석유와 가스의 양을 계산함으로써, 석유의 생성과 이동 시기 예측이 가능하다(Welte *et al.*,

1996; Hantschel and Kauerauf, 2009). 먼저 석유의 경우를 보면, 매몰이 시작되어 근원암층인 상부 쥐라기층(Upper Jurassic)이 심도 약 1,000 m에 도달했을 때인 150 Ma부터 이 상부 쥐라기층(Upper Jurassic)의 하부층부터 석유생성이 시작된다. 약 145 Ma부터는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic)의 상부층에서도 석유생성이 시작되는데(그림 9), 매몰 초기는 지열류량이 매우 높았을 때이므로 얇은 심도임에도 석유생성 단계에 도달하였던 것으로 보인다. 매몰이 계속 진행되어 약 100 Ma에는 분지의 북쪽 가장자리에는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 생성된 일부 석유가 중부층인 사질암층으로 이동하는 것

이 관찰된다(그림 9). 100 Ma까지 매몰을 지속하여 온 퇴적층들은 후기 백악기 동안(100 Ma 이후)에는 용기되고 삭박된다. 따라서 이 기간 동안에는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic) 내에서 석유생성은 정지하게 된다. 그러나 신생대 이후에는 다시 매몰이 시작되어 약 26.5 Ma에는 분지의 남쪽 가장자리에서도 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 생성된 일부 석유가 중부층인 사질암층으로 이동하는 것이 관찰된다(그림 9). 신생대 이후 매몰이 지속되고 석유의 생성이 계속되어 현재에 이르는 것으로 추정된다. 모델링에서 석유의 생성과 이동은 오직 상부 쥐라기층(Upper Jurassic) 내에서만 일어나고, 다른

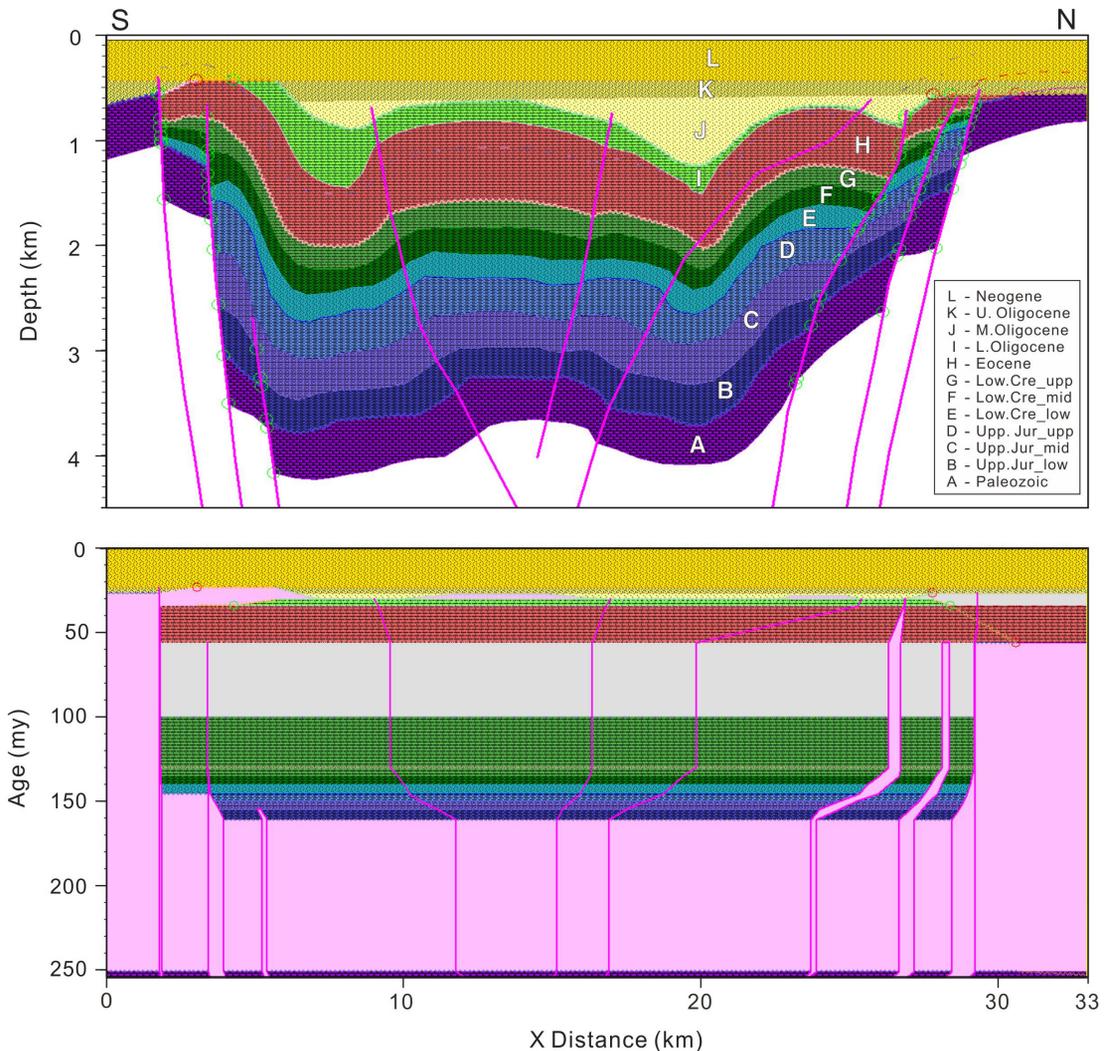


Fig. 8. 2-D input of cross section with depth and age.

퇴적층으로의 이동은 관찰되지 않는다(그림 9).

가스도 비슷한 시기인 약 150 Ma부터 생성되어 근원암에 포화되기 시작한다. 145 Ma부터는 분지의 북쪽 가장자리에서는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 생성된 일부 가스가 지층의 경사를 따라 하위의 기반암층인 고생대 석회암층으로 이동하여 채워지는 것이 관찰된다(그림 10). 100 Ma 까지 매몰이 진행되면서 고생대 석회암층으로의 가스이동은 계속하여 증가한다. 이후 백악기 후기 동안은 매몰이 정지되고 퇴적층이 용기와 삭박을 경험하는 동안 가스포화도는 그대로 유지된다. 그러나, 신생대에 들어서 매몰이 지속되면서 근원암에서의 가스생성은 다시 시작되고 생성된 가스는 고생대 석회암 기반암층과 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 중부대인 사질암층으로 이동한다(그림 10). 이와 같이 가스포화도 모델링에서는 근원암에서 생성된 가스가 하위의 기반암층으로 이동하는 것이 잘 나타나는 것이 특징이다.

석유와 가스의 포화도 모델링 결과, 근원암층인 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 상부층에서 생성된 석유나 가스는 상위의 사질층인 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)으로 이동되는 것이 나타나지 않는다. 이것은 근원암층이 전기 백악기까지는 매몰되고 이후 용기되어 신생대 이후에 다시 매몰이 시작되었으나, 현재 겨우 3,000 m 까지만 매몰되어 충분한 깊이까지 매몰되지 않은 결과로써 배출될 만큼 충분한 양의 석유와 가스가 생성되지 않았으며, 따라서 백악기층으로의 배출도 일어나지 않은 것으로 해석된다.

## 6. 토 의

### 6.1 석유생성 및 이동

서한만 분지의 분지형성과정과 암상층서를 고려할 때 서한만 분지의 가장 유력한 근원암층은 쥐라기 후기에 퇴적된 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)인 것은 의심의 여지가 없다. 즉, 분지발달 초기, 단층에 의해 크고 작은 분지들이 형성된 서한만 지역은 지속적인 침강에 의해서 호수가 형성되고, 여기에 유기물이 풍부한 심호성의 상부 쥐라기층이 퇴적된 것으로 해석된다(Massoud *et al.*, 1991; Choi, 1999). 상부 쥐라기층 내의 유기물들은 매몰되면서

타입 I이 우세한 케로젠을 형성하였을 것이며, 이 케로젠은 매몰심도와 온도가 증가함에 따라 석유와 가스를 생성하게 되고, 근원암의 공극에 많은 양의 석유와 가스가 채워지게 되면(이론적으로 20%) 근원암으로부터 배출되어 주변의 공극률이 큰 퇴적층으로 이동해 갔을 것이다(Okui and Waple, 1993; Welte *et al.*, 1996; Okui *et al.*, 1998).

606공의 1-D 모델에서, 상부 쥐라기 근원암층은 석유생성단계에 도달하여 석유와 가스를 생성하고 있으나 근원암에서 배출되기에 충분한 양의 석유와 가스가 생성되지는 않았다. 이는 서한만 지역은 지속적인 매몰이 일어나지 않았으며 장기간의 용기 및 삭박에 의해 근원암층인 상부 쥐라기층에서 석유가스의 생성이 지속되지 못하였기 때문이다(그림 7). 그러나 606공의 시추심도 보다 깊은 심도에 존재하는 상부 쥐라기층 일부는 충분한 양의 석유를 생성하고 배출시킬 수 있는 온도에 도달하였을 것으로 보인다.

탄성과 단면에 대한 2-D 모델링에서, 매몰이 진행되면서 근원암층인 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)에서 석유와 가스의 생성량(포화도)이 증가되는 것을 볼 수 있다(그림 9, 10). 그러나 다른 퇴적층으로의 석유와 가스의 이동은 크게 일어나지 않는다. 다만, 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata) 자체 내에서 좀 더 공극률이 큰 사질암층으로 이동하는 것이 관찰된다. 즉, 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 중부층으로 이동되는 것이 모델링된다. 또한, 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 생성된 가스가 하위의 석회암 기반암층으로의 이동하는 것도 뚜렷하게 관찰된다. 이것은 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)이 충분히 매몰이 되면 석유와 가스의 배출이 일어나고, 주변의 공극률이 높은 퇴적층으로 이동될 수 있다는 것을 잘 보여주고 있다. 그러나 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 상부층은 석유의 생성은 있으나 배출이 모델링을 통해 제시되지 않는다. 이는 상부 쥐라기층의 상부층은 충분히 매몰되지 않아 배출이 일어날 만큼의 많은 양의 석유와 가스가 생성되지 않았음을 의미한다.

이와 같은 석유생성 모델링 결과, 모델링된 2-D 단면상에서는 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 배출된 탄화수소가 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)의 중부층으로 이동할 뿐만

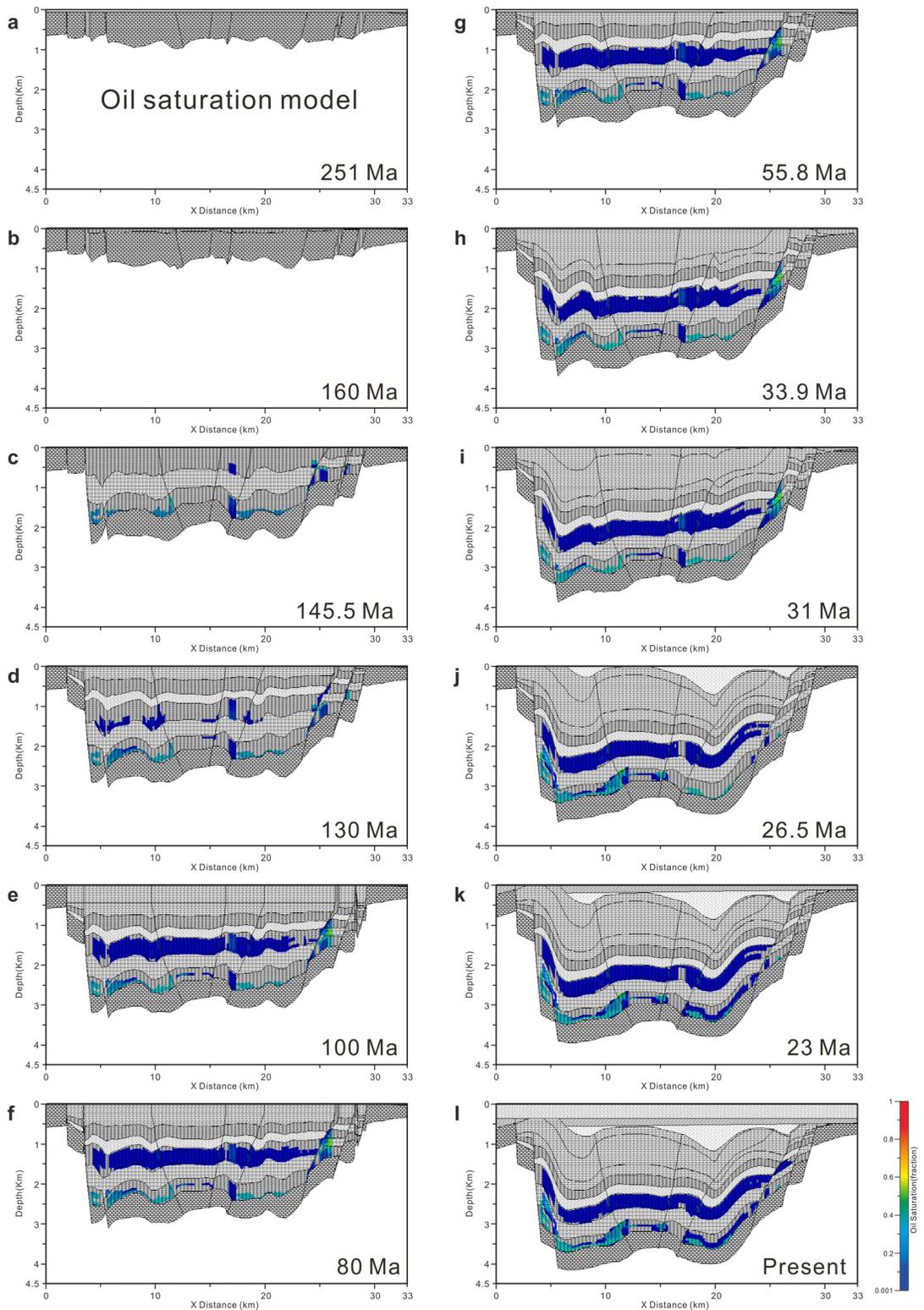


Fig. 9. 2-D petroleum system model (oil saturation).

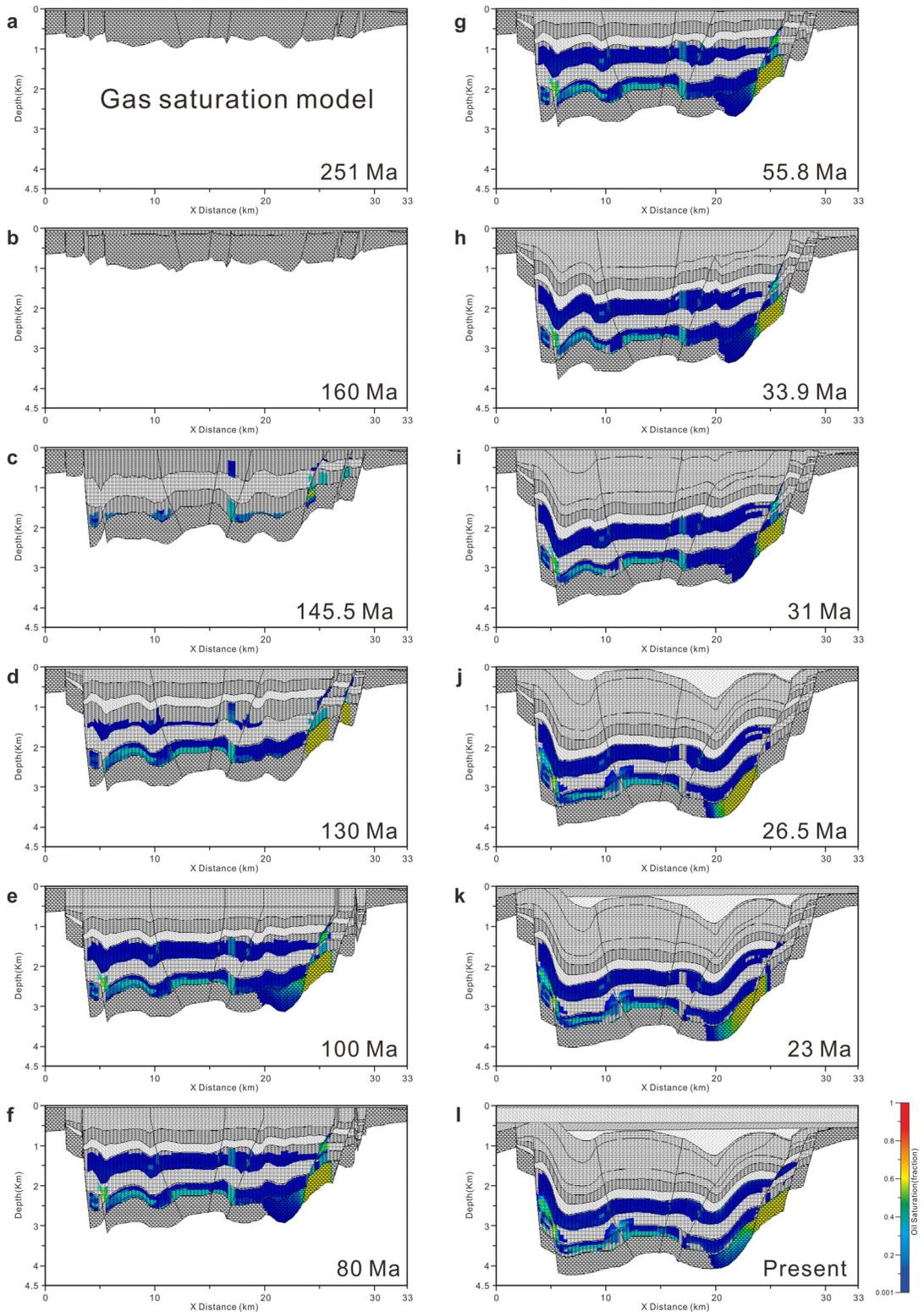


Fig. 10. 2-D petroleum system model (gas saturation).

아니라 주라기 이전의 기반암층인 고생대 탄산염 암층으로도 이동하는 것이 특징적으로 나타난다. 하부층으로의 이동은, 고생대 석회암층이 트라이아스기에서 전기 주라기에 이르는 장기간 동안 대기 중에 노출됨에 따라 카르스트화(karstification)가 일어나게 되어서 용해 및 붕괴에 의한 각력화(solution collapse breccia)가 발생하게 되고, 많은 공극이 발달하였기 때문인 것으로 생각된다(Friedman, 1997; Eliassen and Talbot, 2005). 따라서 상부 주라기층(Upper Jurassic strata)의 하부층에서 생성되어 배출된 탄화수소는 상위층으로의 이동보다는 공극이 발달한 하위의 탄산염암층으로 우선적으로 이동하였을 것으로 해석된다.

서한만 분지에서는 지금까지 13개 공이 시추되었고 모든 시추공에서 형광반응에 의한 유징이 확인되었다(Choi, 1999). 특히, 606 시추공에서는 하부 백악기층에서 석유가 회수되어 원유분석이 수행된 바도 있다(Massoud *et al.*, 1991). 유징이 확인된 퇴적층도 다양하여, 중생대의 상부 주라기층과 하부 백악기층 뿐만 아니라 신생대의 에오세와 올리고세층에서도 유징이 확인되고 있다. 또한, 기반암층인 고생대층에서도 유징이 나타나고 있다. 그러나, 이번 연구에서 수행한 2-D 모델링에서는 하부 백악기층과 신생대층으로의 이동은 나타나지 않는다. 이것은 근원암인 상부 주라기층이 장기간의 용기와 무퇴적 시기를 거치면서 충분히 매몰이 일어나지 않아 다량의 석유가 생성되지 않았고, 배출도 일어나지 않았기 때문이다. 즉, 모델링을 수행한 탄성과 축선이 위치한 지역은 광구의 서쪽지역으로서(그림 1), 분지의 중심보다는 가장자리에 위치하기 때문에 서한만 분지의 전반적인 석유시스템을 반영하지 못하는 것으로 추정된다. 따라서 모델링이 수행된 단면이 존재하는 곳보다 동쪽지역에 위치하고 매몰심도가 깊은 상부 주라기층이 두껍게 발달한 지역에서는 충분한 양의 석유와 가스가 생성되어 상위의 백악기층과 신생대층으로도 이동되었을 것으로 생각된다.

## 6.2 탐사 유망성

1-D 모델링과 2-D 모델링은 제한된 대상위치와 제한된 자료로부터 수행되었기 때문에 서한만 전체에 대한 석유시스템을 확정할 수는 없다. 그러나 모델링 결과와 저자들이 국내·외 개인적 네트워크로

부터 입수한 시추결과에 대한 정보들을 종합할 때 서한만 분지의 석유시스템에 대한 이해는 가능하다.

근원암으로부터 경제성 있는 많은 양의 석유와 가스가 생성되기 위해서는 근원암층 위에 두꺼운 하중암층(overburden rock)이 존재하여야 한다(Magoon and Dow, 1994). 이것은 근원암의 매몰심도가 깊어야 한다는 것을 의미한다. 그러나 서한만 분지의 근원암인 상부 주라기층(Upper Jurassic strata)은 주라기 동안에 두껍게 퇴적되었음에도 불구하고, 장기간의 용기와 무퇴적의 시기를 거치게 됨에 따라 깊이 매몰되지 못하였다. 신생대 이후에 다시 매몰이 진행됨에 따라 석유의 생성을 다시 시작하게 되었으나 석유의 생성에서 배출에 이르는 심도까지 매몰되지 못한 상당한 부분의 상부 주라기층이 존재하게 되었다. 2-D 모델링이 수행된 지역 역시 충분한 생성과 배출이 이루어지지 못한 지역이다. 따라서 모델링이 수행된 곳보다 동쪽지역에 위치하며, 매몰심도가 깊고 퇴적층이 좀 더 두껍게 발달한 분지 중심지역이 석유와 가스발견에 유리할 것으로 생각된다. 정보에 의하면 2-D 모델링이 수행된 지역보다 동쪽지역에서 수행된 시추결과, 하부 백악기층과 신생대층에서도 유징이 확인되고 있다고 알려져 있다(Choi, 1999).

모델링 결과와 시추정보를 종합하면, 근원암인 상부 주라기층에서 생성된 석유는 탄산염 기반암층, 주라기층, 백악기층, 신생대 저류암층으로 이동하였을 것으로 보인다. 단, 이와 같은 조건이 성립되기 위해서는 근원암층이 충분히 매몰된 지역이어야 한다. 따라서 서한만의 석유탐사는 분지 가장자리 보다는 분지 중심부에 집중되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 서한만 분지의 퇴적환경과 각 퇴적층의 암상을 고려해 볼 때, 별도의 광역적인 덮개암층은 존재하지 않는다. 따라서 각 사질층과 교호하는 치밀한 셰일층이 덮개암 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 이와 같은 점들을 고려할 때, 서한만 분지에서는 배사구조를 찾기보다는 퇴적환경을 고려하여 공극률이 높은 지역을 찾는 층서트랩 개념의 탐사가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

## 7. 결론

석유시스템 모델링과 기존의 시추정보로부터 얻어진 서한만 분지의 석유시스템에 대한 결론은 다음

과 같다.

첫째, 서한만 분지의 석유와 가스를 생성한 주요 근원암은 후기 쥐라기 동안 심호환경에서 퇴적된 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)이다.

둘째, 서한만 분지발달 과정에서 장기간의 용기와 무퇴적 기간이 존재함에 따라, 근원암층인 상부 쥐라기(Upper Jurassic)층은 지속적으로 매몰되지 못하였고, 이에 따라 근원암층에서 많은 양의 석유와 가스가 생성은 되었으나 다량의 석유와 가스가 배출되지는 못하였다.

셋째, 근원암층인 상부 쥐라기층(Upper Jurassic strata)에서 배출된 석유와 가스는 상위의 하부 백악기층(Lower Cretaceous strata)과 제3기 퇴적층(Tertiary strata)으로 이동하였을 뿐만 아니라 하위의 탄산염 기반암층으로도 이동하여 저장되었다.

넷째, 서한만 분지에는 광역적인 덮개암층은 존재하지 않으며 퇴적환경과 관련된 사질과 이질암층이 저류암과 덮개암의 기본틀을 이루고 있다. 따라서 이 지역의 탐사를 위해서는 구조트랩 뿐만 아니라, 층서트랩도 석유와 가스의 집적장소로 고려되어야 할 것이다.

이 연구는 제한된 정보와 자료를 바탕으로 수행된 석유시스템 분석이므로 추후 추가적인 정보와 자료가 확보되었을 경우 재해석이 필요하다. 석유탐사는 양질의 탐사자료를 얻기 위하여 상당한 기술력과 예산을 필요로 한다. 그러나, 현재 북한의 기술력과 경제력으로는 이와 같은 양질의 자료를 생산하는 것은 쉽지 않을 것으로 생각된다. 따라서 서한만 분지의 자세한 석유시스템 분석을 위해서 필요한, 양질의 탐사자료는 석유개발 선진국과의 협력이 필수적이다. 또한, 우리도 향후의 남북통일 또는 남북 경제 협력에 대비하기 위하여 지속적으로 북한의 석유지질에 대한 정보와 지식을 확보해 갈 필요가 있다.

## 사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 연구과제 “미래 석유자원 전략지역 유망성 분석 및 정보화(과제 번호 15-3311)” 사업의 지원으로 수행되었다. 원고는 강원대학교 정대교 교수님과 경북대학교 유인창 교수님의 열정적인 지적과 세심한 교정으로 크게 개선되었다. 두 분께 진심으로 감사드린다.

## REFERENCES

- AMINEX, 2005, <https://www.edisoninvestmentresearch.com> (April 4, 2005).
- Cai, Q.Z., 2005, Oil and gas geology in China Seas. Ocean Press, Beijing, 406 p (in Chinese).
- Choi, D.R., 1999, Petroleum geology offshore DPR Korea (north Korea) - West Korea Bay Basin, East Sea Basin and Western Japan Basin. Petrex C. Ltd, Tokyo, 19 p.
- Dai, C.S., 2011, Oil gas basin group of China Seas and early resources assessment techniques. Ocean Press, Beijing, 626 p (in Chinese).
- Eliassen, A. and Talbot, M.R., 2005, Soultion-collapse breccias of the Minkinfjellet and Wordiekammen Formations, Central Spitsbergen, Svalbard: a large gypsum paleokarst system. *Sedimentology*, 52, 775-794.
- Friedman, G.M., 1997, Dissolution-collapse breccias and paleokarst resulting from dissolution of evaporate rocks, especially sulfates. *Carbonates and Evaporites*, 12, 53-63.
- Hantschel, T. and Kauerauf, A., 2009, Fundamentals of basin and petroleum systems modeling. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 476 p.
- JOGMEC, 2006, <https://oilgas-info.jogmec.go.jp> (January 13, 2006).
- Killops, S.D., Massoud, M.S. and Scott, A.C., 1991, Biomarker characterisation of an oil and its possible source rock from offshore Korea Bay Basin. *Applied Geochemistry*, 6, 143-157.
- Kim, S.-H. and Son, B.-K., 2013, Petroleum system modeling of the Jeju Basin, offshore southern Korea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 473-491 (in Korean with English abstract).
- Lee, B.-R. and Son, B.-K., 2007, Petroleum system modeling of continental shelf area, Southwestern margin of the Ulleung Basin. *Journal of the Geological Society of Korea*, 43, 477-499 (in Korean with English abstract).
- Lee, G.H., Kim, B., Chang, S. and Kim, H.J., 2004, Timing for trap formation in the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and implications for hydrocarbon accumulations. *Geoscience Journal*, 8, 369-380.
- Lee, G.H., Kim, B., Shin, K.S. and Sunwoo, D., 2006, Geological evolution and aspects of the petroleum geology of the northern East China Sea self basin. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 90, 237-260.
- Lee, G.H., Yoon, Y., Man, B.H., Lim, H., Kim, Y.S., Kim, H.J. and Lee, K., 2011, Structural evolution of the southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea (Japan Sea) and tectonic implications. *Tectonophysics*, 502,

- 293-307.
- Li, W., Lu, W., Liu, Y. and Xu, J., 2012, Superimposed versus residual basin: The North Yellow Sea Basin. *Geoscience Frontiers*, 3, 33-39.
- Magoon, L.B. and Dow, W.G., 1994, The petroleum system—from source to trap. *The American Association of Petroleum Geologists Memoir* 60, 3-24.
- Massoud, S.D., Killops, S.D., Scott, A.C. and Matthey, D., 1991, Oil source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Uuju Formation, West Korea Bay Basin. Part I: Oil source rock correlation and environment of deposition. *Journal of Petroleum Geology*, 14, 365-386.
- Massoud, S.D., Scott, A.C., Killops, S.D., Matthey, D. and Keeley, M.L., 1993, Oil source rock potential of the lacustrine Jurassic Sim Uuju Formation, West Korea Bay Basin. Part II: Nature of the organic matter and hydrocarbon-generation history. *Journal of Petroleum Geology*, 16, 265-284.
- McKenzie, D., 1978, Some remarks on the development of sedimentary basins. *Earth and Planetary Science Letters*, 40, 25-32.
- Okui, A. and Waple, D.W., 1993, Relative permeabilities and hydrocarbon expulsion from source rocks. In: Doré A.G. *et al.* (eds.) *Basin Modelling: Advance and applications*. Elsevier, Amsterdam, 293-302.
- Okui, A., Siebert, R.M. and Matsubayashi, H., 1998, Simulation of oil expulsion by 1-D and 2-D basin modelling - saturation threshold and relative permeabilities of source rocks. In: Düppenbecker, S.J. and Illiffe, J.E. (eds.) *Basin Modelling: Practice and Progress*. Geological Society, London, Special Publications, 141, 45-72.
- Park, K.-S., Lee, H.-Y., Kang, D.-H. and Shin, W.-C., 2010, Structural development and geological age of rocks in the Gunsan Basin, Yellow Sea: a prospective from seismic data interpretation. *Journal of the Geological Society of Korea*, 46, 577-593 (in Korean with English abstract).
- Peters, K.E., Walters, C.C. and Moldowan, J.M., 2005, *The Biomarker guide. I. Biomarkers and isotopes in the environment and human history*. Cambridge University Press, Cambridge, 471 p.
- Poelchau, H.S., Baker, D.R., Hantschel, T., Horsfield, B. and Wygrala, B., 1997, Basin simulation and the design of the conceptual basin model. In: Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R., (eds.), *Petroleum and basin evolution*. Springer-Verlag, Berlin, 5-70.
- Son, B.-K. and Park, M., 2013, Hydrocarbon generation and migration modeling in southwestern margin of the Ulleung Basin, East Sea. *Journal of the Geological Society of Korea*, 49, 453-471 (in Korean with English abstract).
- Stewart, A., 1999, Glimmers of hope seen in North Korean basins, market. *Oil and Gas Journal*, 97, 62-65.
- Sweeney, J.J. and Burnham, A.K., 1990, Evaluation of a simple model of vitrinite Reflectance Based on Chemical Kinetics. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 19, 1559-1570.
- Ungerer, P., 1990, State of the art of research in kinetic modelling of oil formation and expulsion. *Organic Geochemistry*, 16, 1-25.
- Ungerer, P., Burrus, J., Doligez, B., Chenet, P.Y. and Bessis, F., 1990, Basin evaluation by integrated two-dimensional modeling of heat transfer, fluid flow, hydrocarbon generation, and migration. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 74, 309-335.
- Waples, D.W., 1985, *Geochemistry in petroleum exploration*. D. Reidel Publishing Company, Boston, 232 p.
- Waples, D.W., 1994, Modeling of sedimentary basins and petroleum system. Magoon, L.B. and Dow, W.G. (eds.), *The petroleum system - From source to trap*. AAPG Memoir 60, 307-322.
- Waples, D.W., Kamata, H. and Suizu, M., 1992, The art of maturity modeling. Part 1: Finding a satisfactory geologic model. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76, 1, 31-46.
- Welte, D.H., Horsfield, B. and Baker, D.R., 1996, *Petroleum and basin evolution*. Springer-Verlag, Berlin, 535 p.
- Welte, D.H. and Yalçın, M.N., 1987, Basin modelling - A new comprehensive method in petroleum geology. *Advances in Organic Geochemistry*, 13, 141-151.
- Wu, S., Ni, X. and Cai, F., 2008, Petroleum geological framework and hydrocarbon potential in the Yellow Sea. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 26, 23-34.
- Wygrala, B.P., 1988, Integrated computer-aided basin modeling applied to analysis of hydrocarbon generation history in a Northern Italian oil field. *Organic Geochemistry*, 13, 187-197.
- Yahi, N., Schaefer, R.G. and Littke, R., 2001, Petroleum generation and accumulation in the Berkine basin, eastern Algeria. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 85, 1439-1467.

---

Received : August 31, 2015

Revised : September 18, 2015

Accepted : September 22, 2015